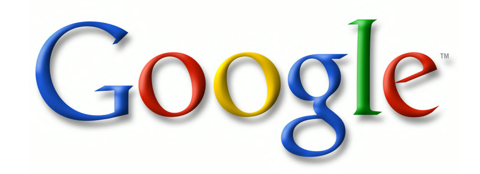
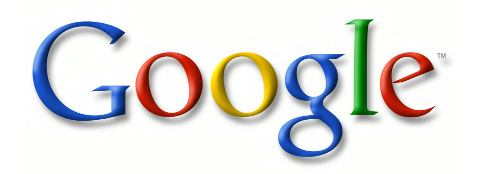
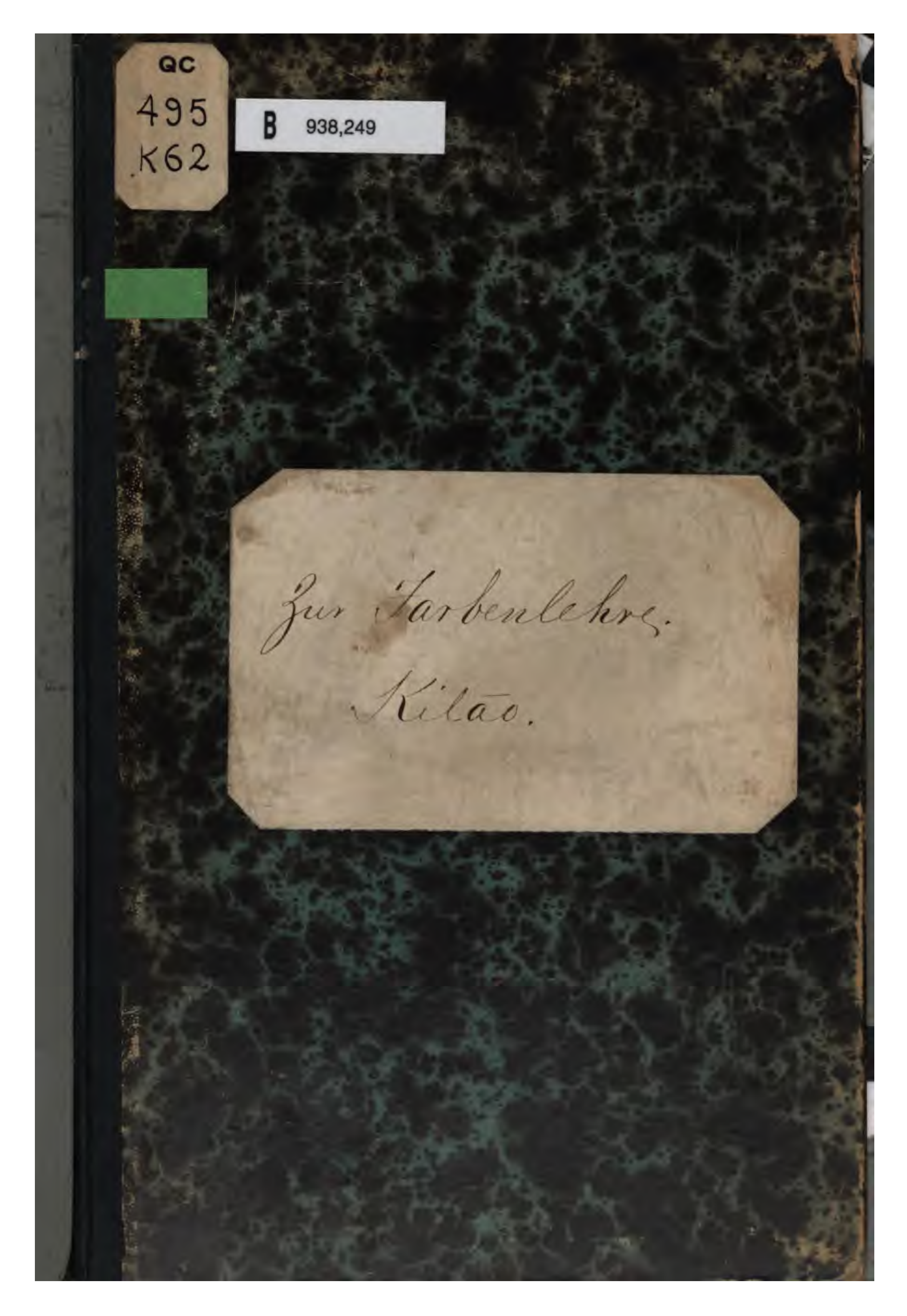
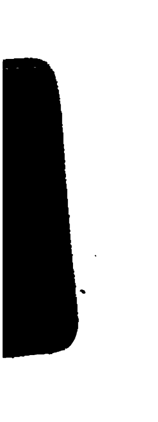
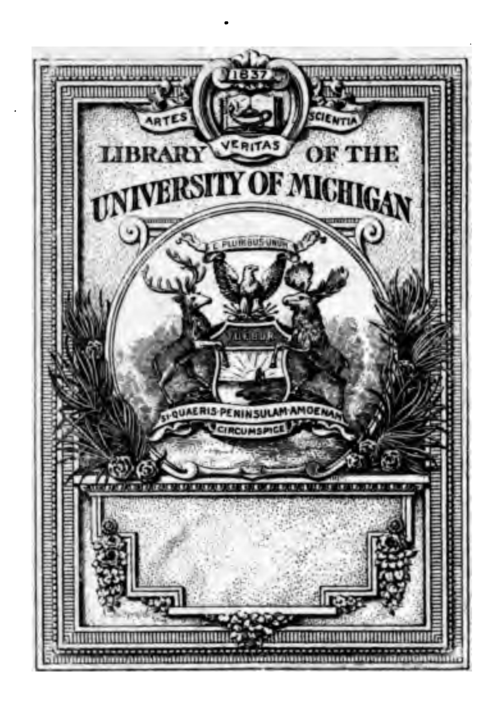




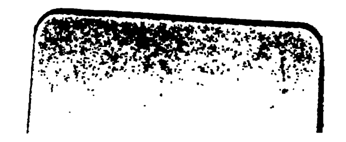

Zur Farbenlehre.
Kilão.




1837
ARTES
SCIENTIA
VERITAS
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
SI·QUAERIS·PENINSULAM·AMOENAM
CIRCUMSPICE


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE


3 9015 03099 3854
UNIVERSITY OF MICHIGAN





ZUR FARBENLEHRE.



INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOCTORWÜRDE

VORGELEGT DER

PHILOSOPHISCHEN FACULTÄT

DER UNIVERSITÄT

GEORGIA-AUGUSTA

ZU

GOETTINGEN

VON

DIRO KITAO

AUS JAPAN.

BERLIN 1878.

BUCHDRUCKEREI VON GUSTAV LANGE (PAUL LANGE).

Meiner Pflegemutter

Frau Marie von Lagerström

in kindlicher Dankbarkeit

gewidmet.

D. Kitao.

Einleitung.

Es soll im Folgenden ein Apparat beschrieben werden, welcher einerseits gestattet, bemerkenswerthe Erscheinungen, die in das Gebiet der physiologischen Optik fallen, zu beobachten, andererseits ein Mittel abzugeben verspricht, um Lichtausstrahlungsvermögen verschiedener Lichtquellen unter verschiedenen Umständen messend zu verfolgen. Die folgende Arbeit sollte sich eigentlich nur mit physikalischen Fragen beschäftigen. Sie ist aber nach und nach dazu gezwungen worden, gewissen Fragen aus dem Gebiete der physiologischen Optik mehr Aufmerksamkeit zuzuwenden, als es in ursprünglicher Absicht lag. Diese physiologischen Fragen zu berühren war zunächst deswegen nothwendig, weil das Verständniss des im folgenden näher zu beschreibenden Apparates und dessen, was der Apparat leisten soll, nur dann möglich ist, wenn die Farbenperceptionsvorgänge in der Netzhaut des Auges gehörig erkannt und in Rechnung gezogen worden sind. Dass diese meine Arbeit einen mehr physiologischen als physikalischen Charakter erhielt, rührt daher, weil dieser Apparat, der den Gegenstand der folgenden Arbeit bildet, sich dazu sehr geeignet zeigt, gewisse Perceptionsvorgänge in der Netzhaut, die sonst sehr schwierig zu beobachten, ja sogar für immer unserer Wahrnehmung entgangen wären, zu beobachten, und durch numerische Angaben festzustellen. Die mit diesem Apparate gewonnen Resultate lassen sich so aussprechen:

1) Versteht man unter „Lichtperceptionsvermögen" das quantitative Perceptionsvermögen der Netzhaut, im Gegensatze zu ihrem Farbenperceptionsvermögen, worunter man bekanntlich das qualitative Perceptionsvermögen versteht, so fällt das Lichtperceptionsvermögen der Netzhaut für verschiedene Individuen verschieden gross aus, und das ganz unabhängig von dem Farbenperceptionsvermögen. Das verschieden grosse Perceptionsvermögen bewirkt, dass das Mengungsverhältniss der Farben, damit eine bestimmte Farbenempfindung hervorgerufen werde, verschieden gross ist, während in Folge des ungleich grossen Lichtperceptionsvermögens die Lichtausstrahlung einer Lichtquelle verschieden gross erscheinen muss.

2) Die Young-Helmholtz'sche Annahme: Roth, Grün und Violett als Grundempfindungen, aus denen sich alle nur möglichen Farbenempfindungen zusammensetzen lassen, reicht nicht allein hin, um auf ungezwungene Weise alle Farbenperceptionsvorgänge in der Netzhaut zu erklären; sie ist wohl auch höchst wahrscheinlich, wenn man diejenige Annahme, welche nicht allein Erscheinungen, die bereits beobachtet worden, erklärt, sondern auch Erscheinungen, die zu beobachten sind, als nothwendige Folgerung hat, mit dem Prädikat „höchst wahrscheinlich" bezeichnet.

3) Hatte ein intensives, weisses Licht auf die Netzhaut eingewirkt, und ist dieselbe auf diese Weise müde gemacht, so scheinen drei Faserarten alle, welche den drei Young-Helmholtzschen Grundempfindungen entsprechen, gleichzeitig gleich grosse Verminderung der Empfindung zu erleiden, so dass das Mengungsverhältniss der Farben, damit eine bestimmte Farbenempfindung entstehe, sowohl für das durch das Einwirken des weissen Lichtes ermüdete Auge, als das in ursprünglicher Stärke empfindende Auge genau dasselbe bleibt.

4) Bei einem und demselben Individuum besitzen (mindestens bei mir) die beiden Augen den merkwürdigen Fehler (um mich so auszudrücken), dass für sie sowohl das Farbenperceptionsvermögen, als das Lichtperceptionsvermögen verschieden gross ausfällt.

§ 1.

Ich gehe zur Beschreibung des Apparates über, mittelst dessen die oben mitgetheilten Resultate gewonnen wurden, und welchen wir fortan „Leukoskop" (λευκός — σκοπῶ) analog dem „Mikroskop" (μικρος — σκοπῶ) nennen wollen. Bei dieser Gelegenheit fühle ich mich gedrungen, dem Herrn Professor Helmholtz, von welchem die diesem Apparate zu Grunde liegende Idee herrührt, hier öffentlich meinen wärmsten Dank auszusprechen. Ein trefflich von Schmidt & Haensch in Berlin construirtes Leukoskop befindet sich im physikalischen Institute der Berliner Universität und ist in Fig. 1 schematisch abgebildet.

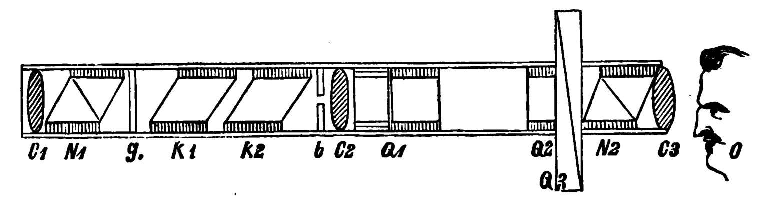


Fig. 1.

Es sind N_1 und N_2 zwei Nicol'sche Prismen, K_1 und K_2 bedeuten zwei genau gleiche Kalkspathrhomboide, r g ein dünnes

Glimmerblättchen, so dünn, dass es Farben erster Ordnung zwischen gekreuzten Nicols zeigt; ς ist eine Spalte, deren Breite durch eine dazu geeignete Vorrichtung beliebig geändert werden kann. Q_1 Q_2 sind zwei senkrecht zur optischen Axe geschnittene Quarzplatten, über deren Dicke noch verfügt werden muss. Q_3 sind zwei keilförmig senkrecht zur Axe geschnittene Quarzplatten, welche an meinem Apparate in entgegengesetzter Richtung drehen, wie die Quarzplatten (Q_1 Q_2). l_1 l_2 l_3 sind Linsen, deren Brennweiten so regulirt werden müssen, dass das beobachtende Auge (O) ein scharfes, vergrössertes Bild der Spalte und entfernte Objecte, deren Bild die Linse l_1 auf die Spalte wirft, sieht. Das Ganze ist in einem inwendig geschwärzten Rohr enthalten, um fremdes, unwillkommenes Licht abzuhalten.

Wie man sieht, ist der Apparat Leukoskop im wesentlichen nichts anderes, als ein Polarisationsapparat und besteht aus drei Theilen, welche einzeln in Fig. 2, 3 und 4 abgebildet sind.

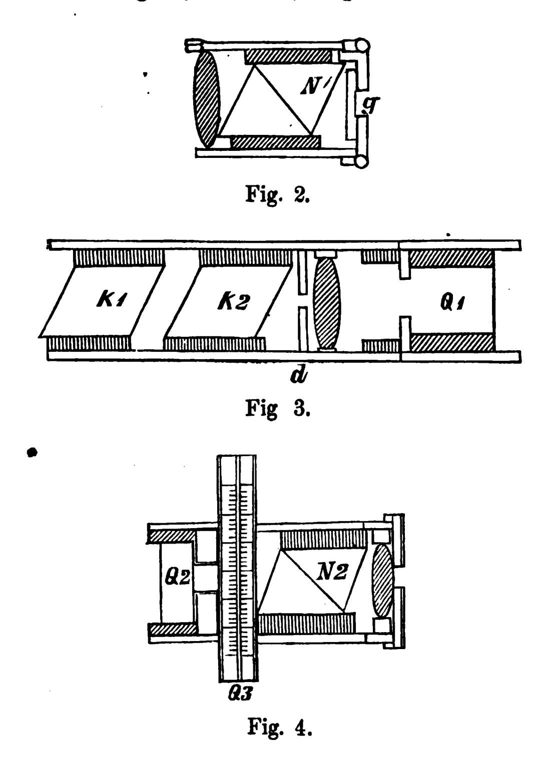


Fig. 2.

Fig 3.

Fig. 4.

Der erste Theil (Fig. 2) enthält ein Nicol'sches Prisma, welches beliebig mit leiser Reibung gedreht werden kann. In g ist das nicoltragende Rohr durch eine Hülse verschlossen, woran ein so dünnes Glimmerblättchen angebracht ist, dass es, wie bereits oben bemerkt worden ist, zwischen gekreuzten Nicols Inter-

ferenzfarben erster Ordnung zeigt, und zwar entweder bläulich-weiss oder gelblich-weiss erscheint. Wenn das Glimmerblättchen so eingestellt ist, dass eine der Hauptschnittsebenen derselben den Winkel 45° mit der Polarisationsebene des Nicols (N_1) einschliesst, so erscheint eine der Interferenzfarben erster Ordnung im Maximum ihrer Intensität. Da es, wie wir in der Folge sehen werden, rathsam ist, die Aenderung der Intensität dieser Farben ganz in der Hand zu haben, so ist die Hülse g, an welcher das Glimmerblättchen angeklebt ist, in dem Rohr, welches das Nicol N_1 trägt, drehbar, um den Winkel zwischen der Polarisationsebene des Nicols (N_1) und einem der Hauptschnitte des Glimmerblättchens beliebig ändern zu können. Wir wollen diesen ersten Theil wegen der Rolle, welche er bekommt, das Compensationsnicol nennen.

Der zweite Theil (Fig. 3) besteht zunächst aus zwei genau gleichen Kalkspathrhomboëdern k_1 k_2, welche hinter einer Spalte ς so angebracht sind, dass die Richtung der Linie, welche die spitzwinkligen Kanten der Kalkspathrhomboëder mit einander verbindet, parallel der Richtung der Spalte (ς) ist. Durch diese Combination zweier Kalkspathrhomboëder erhält man ein grosses einfaches Bild der Spalte, indem man die Breite der Spalte durch eine passend angebrachte Vorrichtung so weit ändert, bis die beiden Bilder der Spalten sich innig berühren. Allerdings kann man statt 2 Kalkspathrhomboëder ein einziges Kalkspathromboëder von doppelter Länge anwenden, um ein einfaches grosses Bild der Spalte zu erhalten. Da aber ein solcher Kalkspathrhomboëder sehr kostspielig, und da ferner die Grösse der beiden Spaltenbilder möglichst gross sein muss, damit eine genaue Vergleichung der etwaigen verschiedenen Färbungen der beiden Spaltenbilder möglich sei, so sind zwei Kalkspathrhomboëder in genau gleicher Lage angewandt worden.

Unmittelbar nach dem zweiten Kalkspathrhomboëder (K_2) ist eine metallene Hülse eingeschraubt, in welcher eine etwa 12 bis 10^{mm} senkrecht zur optischen Axe geschnittene Quarzplatte (Q_1) eingekittet ist.

Der dritte Theil (Fig. 4) endlich besteht aus zwei senkrecht zur Achse geschnittenen, keilförmig geschnittenen Quarzplatten (Q_3), deren Schneide mittelst einer passenden Vorrichtung dicht an einander in entgegengesetzter Richtung geschoben werden kann, also eine Vorrichtung, die bei dem Soleil'schen Saccharometer Anwendung findet, um jede mögliche Dicke der Quarzplatte innerhalb gewisser Grenzen zu erzeugen. Vor diesen Quarzkeilen (Q_3) befindet sich wieder eine ebenfalls senkrecht

zur Axe geschliffene Glasplatte (Q_2), welche aber die Polarisationsebene in entgegengesetzter Richtung dreht, wie die Quarzkeile (Q_3). Die Dicke dieser Quarzplatte (Q_2) ist so gewählt, dass, wenn die an den Keilen (Q_3) zweckmässig angebrachte Skala auf Null zeigt, die eingeschaltete Dicke des Quarzkeils (Q_3) gerade die Dicke dieser Quarzplatte (Q_2) aufhebt. Diese Skala muss so eingerichtet sein, dass an derselben die Dicke der eingeschalteten Quarzplatte sich unmittelbar in Millimetern ablesen lässt. Hinter den Quarzkeilen (Q_3) folgt ein zweites Nicol, dass wir fortan nach dem Vorschlage des Herrn Professor Listing Ocularnicol nennen wollen, dessen Polarisationsebene durch einen eingetheilten Kreis (T) bestimmt werden kann. Der Anfangspunkt, von dem aus dieser Winkel gezählt wird, kann beliebig gewählt werden; man kann denselben so wählen, dass das eine von den beiden Spaltenbildern verschwindet, wenn die Quarzplatten allesammt ausgeschaltet werden, oder so, dass die Intensitäten der beiden Spaltenbilder bei der Ausschaltung der Quarzplatten einander gleich werden, d. h. dass die Polarisationsebene des Ocularnicols (N_2) mit einem der beiden Hauptschnitte des Kalkspathrhomboëders den Winkel 45° einschliesst. Im Folgenden soll als Nullpunkt der erste der oben bezeichneten Punkte gewählt werden.

Die Erscheinungen, welche man an diesem so zusammengesetzten Leukoskope wahrnimmt, sind folgende:

Wir denken uns den ersten Theil (Fig. 2) vorläufig weg, welchen wir mit dem Namen „Compensationsnicol“ belegt haben. Ein Bündel Lichtstrahlen, welche die mit dem Leukoskope betrachtete Lichtquelle aussendet, geht durch das erste Kalkspathrhomboëder (K_1) und werden in zwei aufeinander senkrecht linear polarisirte Strahlen zerspalten. Durch das zweite Kalkspathrhombëder (K_2) wird die Divergenz dieser beiden Lichtstrahlen verdoppelt. Jeder von diesen Strahlen wird nun in den Quarzplatten in je zwei Strahlen verwandelt, welche in entgegengesetzter Richtung kreisförmig schwingen. Diese circular-polarisirten Strahlen kommen dann in dem Ocularnicol zur Interferenz; man wird also die beiden Spaltenbilder im allgemeinen verschieden gefärbt sehen, wenn die mit dem Leukoskop betrachtete Lichtquelle kein homogenes Licht liefert.

Wendet man nun das weisse Tageslicht an, so erscheinen die beiden Bilder der Spalte im Leukoskope bei der bereits angegebenen Dicke der Quarzplatte von $12^{mm}-10^{mm}$ abwechselnd im röthlichen und grünlichen Tone, wenn man das Ocularnicol dreht. Es lehrt uns eine prismatische Zerlegung der beiden Spaltenbilder, dass in den Spectris der beiden Spaltenbilder bei

der oben angegebenen Quarzdicke im allgemeinen drei dunkle Streifen auftreten, die gleichsam gewisse Strahlen von bestimmten Wellenlängen, denen gewisse Farbenempfindungen entsprechen, aus dem in Rede stehenden weissen Lichte wegschneiden. Es seien in Fig. 5 I und II die prismatischen Spectra der beiden Spaltenbilder mit den dunkeln Interferenzstreifen δ_1 δ_2 δ_3 und δ_4 δ_5 δ_6,

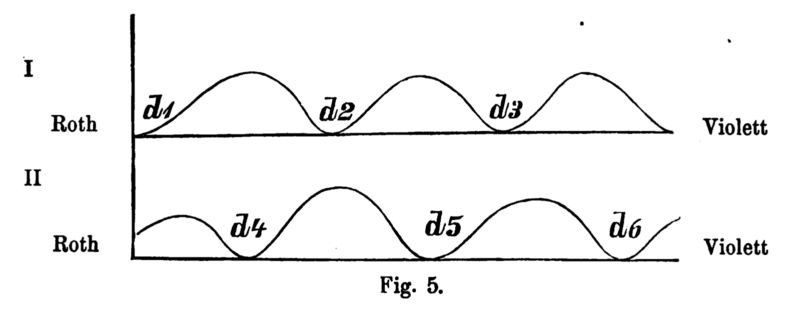


Fig. 5.

wo die Abscissen die Wellenlängen, und die Ordinaten die Lichtstärke darstellen. Wie man sich leicht durch einen Versuch überzeugen kann, hat eine Aenderung der im Leukoskope eingeschalteten Quarzstücke die Erscheinung zur Folge, dass die Anzahl der dunklen Streifen in den Spectris der beiden Spaltenbilder grösser oder kleiner wird, während eine Drehung des Ocularnicols eine Verschiebung der Interferenzstreifen längs der Spectra bewirkt. Es kann also durch eine gewisse Quarzdicke, die zwischen $12^{mm}—10^{mm}$ liegt, und durch eine Drehung des Ocularnicols leicht dahin gebracht werden, dass die dunkeln Streifen δ_1 δ_2 δ_3 in das rothe Ende des Spectrums I in den gelben und blauen Theil derselben fallen, während sie in dem anderen Spectrum (II) in δ_4 δ_5 δ_6 Roth, Grün und Violett bedecken; also dass in dem einen Spectrum Roth, Grün und Violett, in dem anderen Spectrum aber Gelb und Blau im Maximum sind. Da Roth und Violett zusammen den Farbenton Purpur geben, dessen complementäre Farbe das Grün bildet, da ferner Gelb und Blau zusammen nach der berühmten Untersuchung von Helmholtz Weiss geben, so sieht man ein, dass die beiden Spaltenbilder des Leukoskops unter diesen Umständen farblos oder nahezu weiss erscheinen müssen.

Wir wollen künftighin diesen ausgezeichneten Punkt der grössten Entfärbung die „Maximalblässe des Doppelbildes“ nennen.

Nähere Betrachtung zeigt, dass die beiden Spaltenbilder im Leukoskope durch eine gewisse Quarzdicke und durch eine gewisse Drehung des Ocularnicols in der That entfärbt werden

können, aber nie vollständig. Der Farbenton des einen Bildes in der Maximalblässe ist ein schwach bläuliches Weiss, während das andere Spaltenbild einen gelblich weissen Ton zeigt. Aber diese unvollkommene Entfärbung des Doppelbildes wirkt durchaus nicht störend auf die Einstellung des Leukoskops in die Maximalblässe ein, da eine noch so kleine Drehung des Ocularnicols, oder eine noch so kleine Aenderung der Quarzdicke sofort eine Zerstörung der Maximalblässe zur Folge hat, so dass die beiden Spaltenbilder röthliche und grünliche Farbentöne zeigen. Die vollständige Entfärbung der beiden Spaltenbilder kann man indessen mittelst des Compensationsnicols erzwingen, welches wir bereits näher beschrieben haben.

Das Compensationsnicol besteht, wie wir gesehen haben, aus einem Nicol und einem so dünnen Glimmerblättchen, dass es in einem Polarisationsapparate Farben erster Ordnung zeigt. Ersetzt man bei diesem Versuche den Polarisator durch ein Kalkspathrhomboëder, so erblickt man im allgemeinen zwei Bilder, von denen das eine bläulich weiss gefärbt ist, während das andere einen gelblich weissen Ton zeigt. Es ist klar, dass durch das Anbringen des Compensationsnicols am Leukoskope man gleichfalls zwei Spaltenbilder von oben angegebenen Färbungen sieht, wenn alle Quarzplatten ausgeschaltet werden. Wir haben aber bereits gesehen, dass die beiden Spaltenbilder des Leukoskops, ohne das Compensationsnicol, wenn eine Quarzplatte von der erforderlichen Dicke eingeschaltet wird, ganz dieselben Färbungen besitzen, als wenn alle Quarzplatten ausgeschaltet worden wären und man das Compensationsnicol angebracht hätte. Man kann folglich eine vollständige Entfärbung des Doppelbildes der Spalte dadurch erzielen, dass man die Hülse, woran das Glimmerblättchen angeklebt ist, so weit dreht, bis dasjenige bläulich gefärbte Spaltenbild, welches man ohne Einschaltung der Quarzplatten erblickt, mit dem blassgelben Spaltenbilde zusammenfällt, welches in der That ohne das Compensationsnicol durch das Einschalten der Quarzplatten entsteht, und so auch mit dem anderen Bilde der Spalte. Es decken sich also zwei complementär zu einander stehende Farbentöne in jedem der beiden Spaltenbilder; es muss dann das Doppelbild des Leukoskops farblos erscheinen.

Es ist mir gelungen, diese Entfärbung des Doppelbildes im Leukoskope durch das Compensationsnicol in so vollkommenem Maasse zu erreichen, dass die angestrengteste Aufmerksamkeit dazu gehört, die äusserst geringe Spur vom Nuancenunterschiede im Doppelbilde des Leukoskops zu entdecken. Die hierzu nöthigen Daten sind für mein rechtes Auge folgende:

Der Winkel des Ocularnicols 0°
Die Dicke des Glimmerblättchens 0,0273^{mm}.

Der Winkel, welchen einer der Hauptschnitte des Glimmers mit einem Hauptschnitte des Kalkspathrhomboëders (K_1) einschloss, betrug nicht ganz 45°. Die Herstellung der Maximalblässe geschah dann durch die Einschaltung einer Quarzplatte, die 10,47^{mm} dick war, wenn die mit dem Leukoskope betrachtete Lichtquelle eine hell beleuchtete weisse Wolke war.

§ 2.

Der Punkt der Maximalblässe ist aber, wie nähere Untersuchungen zeigen, nicht bei allen Beobachtern derselbe, und zwar so, dass die Quarzdicke, welche für einen Beobachter die Maximalblässe im Leukoskop herzustellen im Stande war, für den anderen Beobachter nicht mehr genügte. Um von neuem zum Punkte der Maximalblässe zu gelangen, muss die Quarzdicke entweder vergrössert oder verkleinet werden, als ob die Lichtemission der mit dem Leukoskope betrachteten Lichtquelle sich geändert hätte, was auf die Einstellung des Leukoskopes in die Maximalblässe von grossem Einfluss ist, wie es aus einem weiter unten näher zu besprechenden Versuche hervorgehen wird. Ich habe in Bezug auf diesen Punkt mehrere Individuen untersucht, indem ich von denselben verlangte, entweder durch die Aenderung der eingeschalteten Quarzdicke, oder durch eine Drehung des Ocularnicols die Maximalblässe, d. h. die Farbengleichheit im Doppelbilde des Leukoskops herzustellen. Manche von den so untersuchten Individuen waren mehr oder weniger mit physikalischen Beobachtungen vertraut, und diese Untersuchungen ergaben, dass die beiden Spaltenbilder des Leukoskops, welche sich für mein Auge in der Maximalblässe befanden, für das Auge eines andern Beobachters ungleich gefärbt waren. Die eine Hälfte des Doppelbildes war für den andern Beobachter röthlich gefärbt, während die andere Hälfte einen grünlichen Farbenton zeigte. Kurz, dass das Farbengleichgewicht im Doppelbilde, das für einen Beobachter bestand, für den andern zerstört war, und zwar so, dass eine entsprechende Aenderung der Quarzdicke, oder eine entsprechende Drehung des Ocularnicols hinreichte, das Farbengleichgewicht im Doppelbilde wieder herzustellen.

Woher rührt diese Erscheinung? Es sind hierfür zwei Ursachen anzunehmen.

1) Es ist denkbar, dass das Perceptionsvermögen der Netzhaut bei verschiedenen Individuen so verschieden gross zeigt, dass Strahlen, welche von einem Individuum noch als „Licht“ em-

pfunden werden können, von einem andern Individuum nicht mehr empfunden werden, mit andern Worten, dass das Lichtperceptionsvermögen der Netzhaut bei verschiedenen Individuen verschieden ausfalle. Daraus folgt, dass die Grenzen der Strahlen im Spectrum, welche noch als „Licht" empfunden werden können, bei verschiedenen Individuen nicht zusammenfallen, d. h. dass, um mich so auszudrücken, die Breite des dem Auge überhaupt sichtbaren Spectrums für verschiedene Individuen grösser oder kleiner ausfällt, als ob die Lichtemission der betrachteten Lichtquelle sich vermehrt oder verringert hätte. Eine Aenderung der Lichtemission einer Lichtquelle zeigt das Leukoskop immer durch eine Zerstörung des Farbengleichgewichtes im Doppelbilde an, wie wir weiter unten sehen werden. Wird nun die Lichtemission eine andere, so ist auch dazu eine verschiedene Dicke der Quarzplatte nöthig, um die Maximalblässe herzustellen, je nachdem man z. B. mit dem Leukoskope eine vom Tageslichte beleuchtete Papierfläche oder die Flamme einer Gaslampe betrachtet. Etwas ähnliches findet auch bei der oben erwähnten Erscheinung statt; die Wiederherstellung der Maximalblässe war bei verschiedenen Individuen immer möglich gewesen.

2) Es ist ferner denkbar, dass diese Erscheinung vielleicht einer Verschiedenheit des Farbenperceptionsvermögens bei verschiedenen Individuen ihre Entstehung verdanke.

Wir wollen im Folgenden dieses näher zu entscheiden suchen.

Nach der Young-Helmholtz'schen Hypothese (Helmholtz: Handbuch der physiologischen Optik § 20 etc.) existiren drei Arten von Nervenfasern in der Netzhaut, welche völlig von einander unabhängig drei qualitativ verschiedene Farbenempfindungen leiten. Nach der Young-Helmholtz'schen Hypothese sind diese Roth, Grün und Violett. Nicht, dass diese drei Arten Nervenfaser nur das Licht, welches die gleichnamige Farbe hat, empfänden, sondern es werden diese drei Faserarten, je nach der Wellenlänge des objectiv homogenen Lichtstrahles gleichzeitig verschieden stark erregt. Die roth empfindenden Nervenfasern werden am stärksten von Lichtstrahlen von grösserer Wellenlänge erregt, von Lichtstrahlen von kleinerer Wellenlänge nur sehr schwach. Die violett empfindenden Nervenfasern werden dagegen durch Lichtstrahlen von kleinerer Wellenlänge am stärksten erregt, während durch Lichtstrahlen von grosser Wellenlänge sehr schwach. Die grün empfindenden Nervenfasern werden aber am stärksten vom Lichte von mittlerer Wellenlänge erregt, sehr schwach von den Lichtstrahlen von grosser und von kleiner Wellenlänge.

Wir denken uns die Erregungsstärke der drei Faserarten als Funktion der Wellenlänge graphisch dargestellt, indem wir uns die Erregungsstärke als Ordinate, die Wellenlänge aber als Abscisse eines rechtwinkligen Coordinatensystems vorstellen, so erhalten wir drei continuirlich verlaufende Curven, welche die in Fig. 6 angedeuteten Gestalten haben.

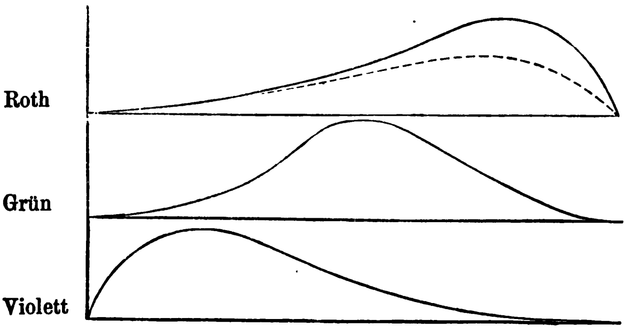


Fig. 6.

Es braucht kaum erwähnt zu werden, dass diese graphische Darstellung nur eine subjective Bedeutung hat. Die Gestalten dieser Curven können sich bei verschiedenen Individuen sehr verschieden erweisen, doch so, dass die Grundtypen dieser Curven, die wir „Empfindungscurven" nennen wollen, dieselben bleiben.

Verhält sich nun die Netzhaut des Auges etwas rothblind gegen das normal empfindende Auge, d. h. zeigt sich die Netzhaut des Auges weniger empfindlich gegen röthliche Farbentöne, so muss die Erregungscurve für die rothempfindende Faserart eine andere Gestalt haben, als beim normal empfindenden Auge, und zwar eine solche Gestalt, dass die Curvenhöhe kleiner als beim normalempfindenden Auge ausfällt, wie es in der Fig. 6 durch Punctiren angedeutet ist. Ist demnach das Auge nicht normal empfindend und verhält sich gegen eine der drei Grundempfindungen mehr oder weniger blind, so wird die Höhe der Empfindungscurve allemal geringer, und der Flächeninhalt zwischen der Empfindungscurve und der Abscissen-Axe dementsprechend auch kleiner. Es folgt daraus, dass die Flächen, welche die Empfindungscurven mit der Abscissenaxe bilden, ein Maass liefern für die Menge von der Netzhaut empfundener Farbe.

Um das, worauf es hierbei hauptsächlich ankommt, leichter übersehen zu können, bedienen wir uns der mathematischen Symbole. Es seien f_r f_g f_v drei gewisse durchaus positive Functionen der Wellenlänge l, welche den Empfindungscurven der drei Faserarten in der Netzhaut für die drei Grundfarben Roth, Grün Violett entsprechen.

Die Integrale

$$\int_{l'}^{l''} f_r dl, \quad \int_{l'}^{l''} f_g dl \quad \int_{l'}^{l''} f_v dl$$

werden dann die Flächen bestimmen, welche einerseits von den Empfindungscurven für drei Grundfarben und andererseits durch die Abscissenaxe (l = Achse) begrenzt werden, wo l'' die Wellenlänge des äussersten rothen Strahles im Spectrum der Lichtquelle welche wir betrachten, und l' die des äussersten violetten Strahles in dem Spectrum bedeutet. Es ist offenbar, dass diese drei Integrale zunächst von der Beschaffenheit der Functionen f_r f_g f_v abhängen, und ausserdem von der Emissionsgrösse der Lichtquelle, da die Integration über die ganze Breite des Lichtspectrums der Lichtquelle ausgedehnt werden muss. Ferner sieht man leicht ein, dass für ein normal empfindendes Auge diese drei Integrale in einem bestimmten Verhältniss zu einander stehen müssen, damit die Empfindung „Weiss" in der Netzhaut erregt werde. Wir verstehen unter „Weiss" das Weiss des gewöhnlichen Tageslichtes, wobei l' und l, wenn auch nicht angebbar, einen ganz bestimmten Werth besitzen. Da aber der Begriff „normalempfindend" von vorwiegend conventioneller Natur ist, so setzen wir fest, dass

$$\text{(I)} \quad \int_{l'}^{l''} f_r dl = \int_{l'}^{l''} f_g dl = \int_{l'}^{l''} f_v dl$$

die Definitionsgleichung der Empfindung „Weiss" für ein normal empfindendes Auge sei. Diese Doppelgleichung sagt nämlich nichts anderes aus, als dass für ein normalempfindendes Auge das „Weiss" entsteht, sobald die drei Grundempfindungen Roth, Grün und Violett in genau gleicher Quantität gemischt werden.

Wenden wir uns nun zurück zu unserm Leukoskope. Wir betrachten zunächst einen objectiv homogen gefärbten Lichtstrahl, dessen Wellenlänge = l ist. Dieser Strahl pflanzt sich fort durch die Quarzplatte Q_1 in Fig. 1 und seine Polarisationsebene erleidet dort eine Drehung Dx, wo D die Dicke der Quarzplatte und x die Drehung der Polarisationsebene des Strahles von der Wellenlänge l in einer 1^{mm} dicken Quarzplatte bedeutet. Der absolute Werth der Schwingungsamplitude dieses Lichtstrahles sei A, so erhalten wir als Intensitäten der beiden Spaltenbilder

$$A^2 \cos^2 (Dx-y), \ A^2 \sin^2 (Dx-y),$$

wo y den Winkel bedeutet, welchen die Schwingungsebene des aus der Quarzplatte hervortretenden Strahles mit der Polarisa-

tionsebene des Ocularnicols einschliesst. Das negative Vorzeichen von y rührt daher, weil bei einem gewissen Werthe von y das eine von den beiden Spaltenbildern verschwinden muss. Gelangen nun die beiden Strahlen mit den oben angegebenen Intensitäten zur Netzhaut, so werden alle drei Arten Nervenfasern nach der Young-Helmholtz'schen Hypothese in Schwingung versetzt, gleichzeitig aber in ungleicher Stärke. Von dem einen Spaltenbilde werden diese drei Faserarten Erregung erfahren, deren Grösse beziehentlich durch

$$f_r \cos^2 (Dx - y) \quad f_g \cos^2 (Dx - y) \quad f_v \cos^2 (Dx - y)$$

dargestellt werden, während diese Nervenfasern von dem anderen Spaltenbilde die Erregungen

$$f_r \sin^2 (Dx - y) \quad f_g \sin^2 (Dx - y) \quad f_v \sin^2 (Dx - y)$$

erleiden. Lassen wir nun l alle möglichen Werthe, die zwischen l' und l'' liegen, durchlaufen, und stellen diese 6 Grössen graphisch dar, so entstehen Curven, die im allgemeinen die in der Fig. 7 dargestellten Gestalten haben.

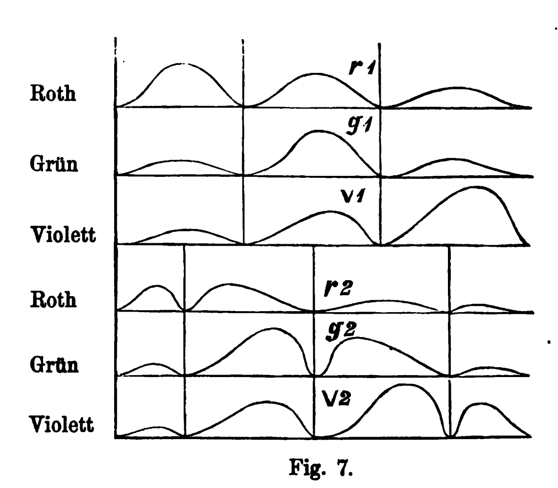


Fig. 7.

Die Gestalten dieser Intensitätscurven hängen im wesentlichen von der Grösse D ab, d. h. von der Dicke der Quarzplatte, welche in das Leukoskop eingeschaltet worden; man ist also im Stande, durch blosse Aenderung der Quarzplatte alle möglichen aber ähnlich gestalteten Erregungscurven, wie die oben dargestellten, in Bezug auf die beiden Spaltenbilder zu erzeugen. Wir können mithin durch blosse Aenderung der Quarzplatte das Verhältniss der Mengung der drei Grundfarben in den beiden Spaltenbildern beliebige Werthe annehmen lassen. Ist nun die Dicke der Quarzplatte so gewählt, dass in den beiden Spaltenbildern die drei Grundfarben in gleicher Menge enthalten sind, d. h. dass

$$r_1 = g_1 = v_1$$
$$r_2 = g_2 = v_2$$

werden, so werden die beiden Spaltenbilder sich im Punkte der Maximalblässe befinden. Da

$$r_1 = \int_{l'}^{l''} f_r \cos^2(Dx-y)\, dl$$
$$= {}^1/_2 \int_{l'}^{l''} f_r \cos 2(Dx-y)\, dl + {}^1/_2 \int_{l'}^{l''} f_r dl.$$

und

$$r_2 = \int_{l'}^{l''} f_r \sin^2(Dx-y)\, dl$$
$$= {}^1/_2 \int_{l'}^{l''} f_r dl - {}^1/_2 \int_{l'}^{l''} f_r \cos 2\,(Dx-y)\, dl.$$

so erhalten wir als Bedingungsgleichung der Maximalblässe, indem wir die Bedingungsgleichung für „Weiss" (I) berücksichtigen

$$\int_{l'}^{l''} f_r \cos 2(Dx-y)\, dl = \int_{l'}^{l''} f_g \cos 2(Dx-y)\, dl = \int_{l'}^{l''} f_v \cos 2\,(Dx-y)\, dl.$$

Dass die Maximalblässe möglich sei, kommt darauf hinaus, dass

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{g_2}{g_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{const.} = c$$

wo die Constante c nachweislich ein positiver echter Bruch ist, vorausgesetzt, dass f_r f_g f_v innerhalb der Integrationsgrenzen l' und l'' stetig, eindeutig und endlich bleiben, was sie auch zu thun scheinen. Denn est ist zunächst

$$r_2 = c\, r_1 \quad \text{d. i.}$$

$$\int_{l'}^{l''} f_r dl - \int_{l'}^{l''} f_r \cos 2\,(Dx-y)\, dl = c \int_{l'}^{l''} f_r dl + c \int_{l'}^{l''} f_r \cos 2\,(Dx-y)\, dl$$

woraus folgt

$$\int_{l'}^{l''} f_r dl = \frac{(1+c)}{(1-c)} \int_{l'}^{l''} f_r \cos 2\,(Dx-y)\, dl$$

ganz ebenso erhält man

$$\int_{l'}^{l''} f_g dl = \frac{(1+c)}{(1-c)} \int_{l'}^{l''} f_g \cos 2 (Dx - y)\, dl$$

$$\int_{l'}^{l''} f_v dl = \frac{(1+c)}{(1-c)} \int_{l'}^{l''} f_v \cos 2 (Dx - y)\, dl.$$

Mit Rücksicht auf die Gleichung (I) erhält man, wie oben, als Bedingungsgleichung der Maximalblässe

$$\int_{l'}^{l''} f_r \cos 2 (Dx - y)\, dl = \int_{l'}^{l''} f_g \cos 2 (Dx - y)\, dl = \int_{l'}^{l''} f_v \cos 2 (Dx - y)\, dl.$$

Diese Doppelgleichung kann in zwei Fällen nicht erfüllt werden. 1) Wenn eine der beiden Empfindungsfunctionen f_r f_g f_v so beschaffen ist, dass der Werth eines der drei Integrale (I) kleiner ausfällt, d. h. wenn die Netzhaut des Auges sich gegen eine der drei Grundempfindungen Roth, Grün und Violett weniger empfindlich, als beim normalen Zustande, zeigt. 2) Wenn die Functionen f_r f_g f_v so beschaffen, dass die drei Integrale (I) alle verschiedene Werthe besitzen, also die Bedingungsgleichung für die Empfindung „Weiss" nicht mehr besteht, d. h. wenn die Netzhaut des Auges sich gleichzeitig gegen zwei der drei Grundempfindungen im gewissen Grade blind verhält. Im ersten Fall wird aber die Maximalblässe im Leukoskope gar nicht zerstört sein, denn wenn die Netzhaut des Auges z. B. mit einer Rothblindheit von gewissem Grade behaftet ist, so dass

$$\int_{l'}^{l''} f_r dl \angle \int_{l'}^{l''} f_g dl$$

$$\int_{l'}^{l''} f_r dl \angle \int_{l'}^{l''} f_v dl$$

mithin auch

$$\int_{l'}^{l''} f_r \cos 2 (Dx - y)\, dl \angle \int_{l'}^{l''} f_g \cos 2 (Dx - y)\, dl$$

$$\int_{l'}^{l''} f_r \cos 2 (Dx - y)\, dl \angle \int_{l'}^{l''} f_v \cos 2 (Dx - y)\, dl$$

so besteht trotzdem noch

$$\int_{l'}^{l''} f_g dl = \int_{l'}^{l''} f_v dl$$

folglich auch

$$\int_{l'}^{l''} f_g \cos 2(Dx - y)\, dl = \int_{l'}^{l''} f_v \cos 2(Dx - y)\, dl$$

In diesem Falle ist also das Farbengleichgewicht im Doppelbilde der Spalte möglich, und wenn es im Leukoskope bereits hergestellt ist, gar nicht zerstört sein, nur wird das Doppelbild in einem Farbentone erscheinen, als fehle eine gewisse Menge Roth im Doppelbilde, so dass es grünlich weisse Färbung besitzt.

In dem letzteren Fall dagegen, wo die Bedingungsgleichung für „Weiss“ durchaus nicht mehr bestehen kann, wo also die Netzhaut im gewissen Grade für zwei von den drei Grundempfindungen blind ist, da besteht die Bedingungsgleichung für die Maximalblässe (II) auch nicht mehr. In diesem Falle wird die Herstellung des Farbengleichgewichtes im Doppelbilde nicht mehr möglich sein, und wenn die Maximalblässe einmal für ein normal empfindendes Auge hergestellt ist, wird sie zerstört erscheinen.

Bei jedem normal empfindenden Auge, wofür die Gleichung I giltig ist, kann der Zustand der Farbenblindheit, wenn auch nur im geringern Grade und kurze Zeit andauernd, herbeigeführt werden, indem man auf die Netzhaut Strahlen von gewisser Wellenlänge, für welche man das Auge abblenden will, längere Zeit hindurch einwirken lässt, und dasselbe in den sogenannten Ermüdungszustand versetzt. Dieser Zustand ist dadurch characterisirt, dass die Netzhaut, nachdem die in Rede stehenden Lichtstrahlen aufgehört haben einzuwirken, für die Farbenempfindungen, denen diese Lichtstrahlen entsprechen, geringere Empfindlichkeit zeigt, als für andere Farbenempfindungen, geradezu so, als ob die Netzhaut sich gegen diese Lichtstrahlen, die einwirkten, im gewissen Grade blind verhielte, oder als ob in der Lichtquelle, welche wir mit dem so abgeblendeten Auge betrachten, eben die Strahlen fehlten, welche eingewirkt haben.

In diesem Falle werden also die Functionen f_r f_g f_v eine gewisse Verminderung ihrer Werthe erleiden, und zwar gleichzeitig und auf gewisse Weise. Wir denken uns zunächst: es werde die Netzhaut für einen objectiv homogenen Lichtstrahl von grosser Wellenlänge abgeblendet, oder, wie wir lieber sagen

wollen, gedämpft für die Farbe, die diesem Strahle entspricht, so werden von den drei Young-Helmholtz'schen Faserarten die rothempfindenden Nervenfaser am stärksten gedämpft, weil die rothempfindende Faserart am stärkesten durch den Strahl, der einwirkt, erregt wird. Die beiden andern Faserarten werden gleichzeitig mit der rothempfindenden Faserart auch gedämpft. Die Grösse der Dämpfung, die diese beiden Faserarten erleiden, muss sehr klein ausfallen, da diese beiden Faserarten sehr schwach durch einen Lichtstrahl von grosser Wellenlänge erregt werden. Es kann also die Dämpfung, welche unter diesen Umständen die grün- und violettempfindenden Nervenfasern erleiden, verschwindend klein gegen diejenige der rothempfindenden Faserart angesehen werden.

Es folgt hieraus, dass man die Netzhaut, wenn sie durch die Einwirkung des Strahles von grosser Wellenlänge ermüdet ist, betrachten kann, als ob sie im gewissen Grade rothblind wäre. Ganz dasselbe Verhältniss wird stattfinden, wenn die Netzhaut durch Einwirkung der Strahlen gedämpft wird, die mittlere oder kleine Wellenlängen haben. In diesem Falle werden sowohl die grünempfindenden als violettempfindenden Nervenfasern am stärksten gedämpft, und man kann also, je nachdem das einwirkende Licht grün oder violett war, das für die Grundempfindung gedämpfte Auge ansehen, als wäre dasselbe etwas grün- oder violettblind. Fassen wir den Fall in's Auge, wo die partielle Unwirksamkeit eines der drei Faserarten durch die Einwirkung der entsprechenden Grundfarbe herbeigeführt worden ist, wo man das Auge eben für diese Farbenempfindung als etwas blind betrachten kann. Wir sahen bereits, dass die auf solche Weise hervorgerufene partielle Farbenblindheit auf die Einstellung des Leukoscops in die Maximalblässe von keinerlei Einfluss ist. Ist das Leukoscop für ein normalempfindendes Auge in den Punkt der Maximalblässe eingestellt, so wird das Farbengleichgewicht im Doppelbilde der Spalte gar nicht zerstört erscheinen, wenn man das Doppelbild mit einem Auge betrachtet, das für eine der drei Grundfarben gedämpft worden.

Dieses bisher Betrachtete giebt uns ein Mittel an die Hand, um zu entscheiden, ob die am Eingange dieses Paragraphen besprochene Erscheinung von einer Verschiedenheit des Lichtperceptionsvermögens bei verschiedenen Individuen herrühre oder einer Verschiedenheit des Farbenperceptionsvermögens ihre Entstehung verdanke.

Es ist immer mit grosser Leichtigkeit nachweisbar, dass das Farbenperceptionsvermögen bei verschiedenen Individuen verschieden ausfällt. Dass aber dieses verschiedene Farbenpercep-

tionsvermögen auf die Einstellung des Leukoscops in die Maximalblässe keinen Einfluss ausübt, überzeugt man sich auf die folgende Weise: Man stellt im Leucoscope den Punkt der Maximalblässe her, nachdem das Auge im Dunkel verweilt und die möglichst grosse Perceptionsfähigkeit erlangt hatte. Man lässt dann successiv die drei Grundempfindungen roth, grün, violett in grosser Sättigung, wie sich solche durch das prismatische Sonnenspectrum gewinnen lassen, auf die Netzhaut längere Zeit hindurch einwirken und blickt schnell in das Leucoscop, dessen Doppelbild der Spalte, wie gesagt, bereits in der Maximalblässe sich befand. Die Netzhaut des Auges ist in diesem Augenblicke im gewissen Grade blind gegen eine der Grundempfindungen, d. h. das Farbenperceptionsvermögen der Netzhaut ist geringer geworden, als im normalen Zustande. Man beobachtet dann keine Zerstörung des Farbengleichgewichts im Doppelbilde der Spalte, nur wird das Doppelbild mit einem Farbentone überzogen, welches der Grundfarbe, wofür die Netzhaut gedämpft worden, complimentär ist.

Es kann eine Verschiedenheit des Farbenperceptionsvermögens also nicht bewirkt haben, dass die die Maximalblässe bedingende Quarzdicke bei verschiedenen Individuen verschieden gross ausfällt. Selbst dann auch nicht, wenn die Netzhaut so beschaffen, dass sie mit einer partiellen Blindheit gegen zwei der drei Grundfarben behaftet ist; denn in diesem Falle wäre die Herstellung der Maximalblässe im Leukoskope ein Ding der Unmöglichkeit, wie wir oben hergeleitet, und wie wir weiter unten sehen werden, aber die Maximalblässe war immer bei verschiedenen Individuen möglich gewesen, d. h. jeder Beobachter könnte eine ganz bestimmte Quarzdicke angeben, die das Farbengleichgewicht im Doppelbilde herstellt. Die am Eingang dieses Parapraphen zur Sprache gekommene Erscheinung muss folglich von der Verschiedenheit des Lichtperceptionsvermögens herrühren, vermöge deren die Emissionsgrösse einer Lichtquelle verschieden gross erscheint*).

§ 3.

Umgekehrt kann das Leukoskop den Nachweis liefern, dass die Young-Helmholtz'sche Annahme von den drei Grundempfindungen Roth, Grün und Violett nicht allein hinreicht, um verschiedene Farbenperceptionsvorgänge in der Netzhaut zu erklären, sondern auch im höchsten Grade wahrscheinlich ist.

*) Wovon diese Verschiedenheit des Lichtperceptionsvermögens bei verschiedenen Individuen herrührt, kann ich nicht angeben. Herr Prof. Helmholtz sprach gelegentlich die Vermuthung aus, dass dieses der ungleichen Absorption der Lichtstrahlen im gelben Flecke seine Entstehung verdanke.

Wie wir im vorhergehenden Paragraphen hergeleitet haben, muss das für ein normal empfindendes Auge hergestellte Farbengleichgewicht im Doppelbilde der Spalte dann zerstört erscheinen, wenn für das beobachtende Auge die Doppelgleichung (I) durchaus nicht mehr besteht, d. h. wenn die Netzhaut des Auges sich ungleich empfindlich gegen zwei der drei Grundempfindungen erweist. Diese Zerstörung des Farbengleichgewichtes muss aber derart sein, dass die Wiederherstellung des Farbengleichgewichtes im Doppelbilde unmöglich wird.

Wir haben ferner oben gesehen, dass eine partielle Farbenblindheit einer normal-empfindlichen Netzhaut dadurch herbeigeführt werden kann, indem man auf dieselbe eine der drei Grundempfindungen längere Zeit hindurch einwirken lässt, und dieselbe in den sogenannten Ermüdungszustand versetzt. Für die so partiell blindgemachte Netzhaut findet, wie wir oben gesehen haben, eine Zerstörung des Farbengleichgewichtes im Leukoskope nicht statt. Wird nun aber die Netzhaut von Lichtstrahlen solcher Wellenlänge getroffen und längere Zeit hindurch erregt, dass keine der drei Faserarten ein Maximum der Erregung erfährt, was bei der Einwirkung einer Grundfarbe der Fall ist, sondern alle drei Faserarten gleichzeitig, in ungleicher endlicher Stärke erregt werden; also dass alle drei Faserarten, nachdem das Licht aufgehört hat, einzuwirken, gleichzeitig in ungleicher, endlicher Stärke gedämpft worden sind; wenn, was wir bisher stillschweigend vorausgesetzt haben, der Grad der Dämpfung der Erregungsstärke proportional ist. Unter diesem Umstande kann man dann die Netzhaut betrachten, als wäre sie für zwei der Grundempfindungen im gewissen Grade blind, so dass die Gleichung (I) mithin auch die Gleichung für die Maximalblässe (II) nicht mehr stattfindet. Dann wird die Maximalblässe im Leukoskop zerstört sein, und zwar so, dass die Wiederherstellung derselben für das aufdie oben angegebene Weise abgeblendete Auge unmöglich ist. Das Leukoskop kann also, wie man sieht, dazu dienen, um zu prüfen, ob man überhaupt die drei Farben Roth, Grün und Violett als drei Grundempfindungen, aus denen alle nur möglichen Farbenempfindungen sich zusammensetzenlassen, zu betrachten habe.

Ich entwickelte ein Sonnenspectrum mittelst eines mit Schwefelkohlenstoff gefüllten Hohlprismas (ein Glasprisma befand sich nicht in meinem Besitze), auf einem dunklen Schirm, in dessen Mitte ein kleines Loch angebracht ist, und welches längs des Sonnenspectrums bewegt werden konnte. Durch das kleine Schirmloch dringt ein Bündel spectraler Strahlen, deren Farbe als homogen betrachtet werden kann.

Durch das Bewegen des Schirmes längs des Spectrums ist man also im Stande, objectiv homogene Lichtstrahlen von allen möglichen Wellenlängen von dem übrigen Theile des Spectrums abzusondern und auf die Netzhaut einwirken zu lassen, indem das Auge unmittelbar an dem Loch des dunkeln Schirmes angebracht wird. Ich stellte im Leukoskope, bevor der Versuch begann, durch eine Verschiebung der beiden Quarzkeile an einander den Punkt der Maximalblässe her, und die angewandte Lichtquelle war eine vom Sonnenlicht erleuchtete weisse Papierfläche. Obgleich der von der Papierfläche reflectirte Lichtstrahl immer theilweise polarisirt ist, so kann man hierbei von dieser theilweisen Polarisation ganz absehen, da der Incidenzwinkel des Sonnenlichtes bei diesem Versuche sehr gross genommen wurde. Nun blickte ich durch das kleine Schirmloch und liess 1 bis 1½ Minuten lang die so abgesonderte Farbe auf die Netzhaut einwirken, um unmittelbar darauf schnell das Doppelbild des Leukoskops zu betrachten. Auf diese Weise erhielte ich folgende Resultate:

Dämpfungsfarbe	Wellenlänge	Das Bild I	Das Bild II
Roth	0,000687^{mm}	Grünlich blau	Grünlich blau
Roth	0,000676^{mm}	Grünlich blau	Grünlich blau
Helles Roth	0,000654^{mm}	Grünlich blau	Grünlich blau
Orange	0,000567^{mm}	Bläulicher Ton	Blau (tief)
Orangegelb	0,000588^{mm}	Blau	Dunkelblau
Gelb	0,000565^{mm}	Blau	Indigo
Gelbgrün	0,000532^{mm}	Violett	Röthlich. Violett
Grün	0,000500^{mm}	Purpur	Purpur
Grün	0,000484^{mm}	Purpur	Purpurroth
Grünblau	0,000465^{mm}	Roth	Purpurroth
Blau	0,000430^{mm}	Gelb	Braungelb
Blau violett	0,000390^{mm}	Gelbliches Grün	Gelblicher Ton

Weiter so fortzufahren bis an das violette Ende des Spectrums, war ich leider nicht im Stande, da meine Augen trotz der längeren Erholungspausen, die ich ihnen gönnte, stark mitgenommen wurden. Das Bild (I) ist dasjenige von den beiden Spaltenbildern im Leukoskope, wo Roth, Grün und Violett im Maximum enthalten sind, während das Bild (II) das Spaltenbild bedeutet, wo gelb und Blau im Maximum auftreten. Die Wellenlängen der Lichtstrahlen, die auf die Netzhaut einwirkten, sind aus denen der Fraunhofer'schen Linien durch

Interpoliren gefunden worden und machen auf Genauigkeit deshalb keinen Anspruch.

Ein Blick auf diese oben mitgetheilte Tabelle zeigt uns, dass es im Spectrum in der That Punkte giebt, wo die Maximalblässe im Leukoskope nicht zerstört wird, wenn die Netzhaut für die Farbe dieser Spectrumtheile gedämpft worden ist. Haben dagegen alle übrigen Theile des Spectrums einzeln auf die Netzhaut eingewirkt, so erscheint das Farbengleichgewicht im Doppelbilde des Leukoskops zerstört, ohne dass es möglich gewesen wäre, durch Vermehrung oder Verminderung der eingeschalteten Quarzdicke ein neues Farbengleichgewicht im Doppelbilde herzustellen.

Es springt ferner der merkwürdige Umstand in die Augen, dass in dem Bilde (I), wo Roth, Grün und Violett im Maximum vorhanden sind, das Farbengleichgewicht gewissermassen ein stabiles ist, indem das Bild (I) immer mit einem Farbenton überzogen wird, welches der Dämpfungsfarbe complementär ist. Ganz anders aber das Spaltenbild (II). In diesem scheint das Farbengleichgewicht, vermöge dessen das Bild (II) weiss erscheint, um mich so auszusprechen, ein labiles zu sein; denn nicht immer bedeckt sich das für das ungedämpfte Auge in Maximalblässe befindliche Bild (II) mit einem Farbentone, welches mit der Dämpfungsfarbe zusammen sich zu „Weiss" ergänzt.

Aus diesem merkwürdigen Umstande lässt sich schon schliessen, dass die drei Farben Roth, Grün und Violett eine gewisse ausgezeichnete Rolle in der Farbenempfindung spielen müssen, vielleicht als Grundempfindungen, aus denen sich alle anderen nur möglichen Farbenempfindungen zusammensetzen lassen.

Dass aber diese drei Farben Roth, Grün und Violett in der That Grundempfindungen sind und keine anderen Spectralfarben, ist unmittelbar aus der oben mitgetheilten Tabelle ersichtlich. Wir haben bereits zu erörtern die Gelegenheit gehabt, dass im Doppelbilde des Leukoskops das Farbengleichgewicht gar nicht zerstört wird, wenn die Netzhaut sich gegen eine der drei Grundfarben blind zeigt, oder für diese Farbe gedämpft worden ist. Die Färbung des Doppelbildes ändert sich nur insofern, als das Doppelbild mit einer Farbe überzogen erscheint, welche complementär zur Dämpfungsfarbe ist. Würde aber die Netzhaut gleichzeitig und in ungleicher Stärke für zwei der drei Grundempfindungen gedämpft, was der Fall ist, wenn die Netzhaut von Farben getroffen werden, die nicht in die Grundfarben gehören, so findet eine Zerstörung des Farbengleichgewichtes im Doppelbilde des Leukoscops statt.

Wir schliessen hieraus: Diejenige Dämpfungsfarbe, welche keine Zerstörung des Farbengleichgewichtes im Doppelbilde des Leukoskops zur Folge hat, muss zu den Grundfarben gehören. Die Farbenempfindungen Roth, Grün und Violett haben, als Dämpfungsfarben keine Zerstörung des Farbengleichgewichtes im Leukoskop zur Folge: sie müssen Grundempfindungen sein.

Wegen der grossen Tragweite dieses Satzes gebe ich hier kurz die Bedingungen des Versuches an, durch den ich zu dem oben ausgesprochenen Satze gelangte. Eine Wiederholung dieses Versuches durch einen andern Beobachter ist wünschenswerth. Zunächst muss man schnell und zwar so schnell wie nur möglich in das Leukoskop blicken, nachdem man auf die Netzhaut Strahlen von gewisser Farbe hat einwirken lassen. (Obwohl der Ermüdungszustand der Netzhaut nach der Einwirkung der Dämpfungsfarben noch ziemlich lange Zeit hindurch andauert, so verschwindet das Maximum der Dämpfung doch äusserst schnell, und wenn man nicht schnell genug nach der Dämpfung der Netzhaut in das Leukoskop blickt, dann bekommt man nur mit den abklingenden Nachbildern zu thun, was natürlich das Misslingen des eben erwähnten Versuches herbeiführt. Es müssen ferner die bei diesem Versuche anzuwendenden Spectralfarben grosse Sättigung haben, ihre Intensität d. h. ihre Leuchtkraft darf aber über eine gewisse Grenze nicht hinaus wachsen, weil dann die Beurtheilung der Färbungen in den beiden Spaltenbildern des Leukoscops sehr schwierig wird. Die Hauptsache ist aber, dass man den Versuch nicht unmittelbar hinter einander wiederholt. Man muss, nachdem eine Beobachtung gemacht worden, den Augen längere Erholungspausen gönnen, indem man sie zuschliesst oder besser das ganze Gesichtsfeld durch das Anbringen eines dunklen Schirmes verfinstert.

Farbige Gläser und mit farbigen Pigmenten bestrichene Papiere lassen sich auch gut zu diesem Versuche verwenden; der in Rede stehende Versuch gelingt immer, wenn auch unvollkommener, als bei der Anwendung der tiefgesättigten Spectralfarben, wenn die farbigen Gläser oder Papiere genügend objectiv homogene Lichtstrahlen durchlassen, oder reflectiren, und, was hauptsächlich zu berücksichtigen, stark beleuchtet werden.

Es besteht zwischen den Resultaten der Farbenzusammensetzung und -Zersetzung ein anscheinend unerklärlicher Widerspruch. Denn die prismatische Analyse des gewöhnlichen weissen Tageslichtes zeigt uns, dass dasselbe von allen möglichen Farbentönen zusammengesetzt ist, während ganz dieselbe Empfindung,

welche das Tageslicht auf unser Sehorgan macht, durch die Mischung je zweier ganz bestimmter Farbentöne zusammengesetzt werden kann. Um diesen scheinbaren Widerspruch zu beseitigen, stellte Brewster bekanntlich die Hypothese auf, dass ein Lichtstrahl von constanter Brechbarkeit doch kein homogenes Licht von einer unveränderlichen Farbe sei, sondern dass in jedem Theile des Lichtspectrums Licht von dreierlei Farben, die sogenannten Grundfarben, existiren, so dass das ganze prismatische Lichtspectrum gleichsam aus drei gleich langen, verschieden homogen gefärbten Spectris, den Spectris der drei Grundfarben bestehe. Brewster nahm als Grundfarben Roth, Gelb und Violett an. Dass der oben erwähnte Widerspruch nur ein scheinbarer, also gar nicht vorhanden ist; dass ferner die Brewster'sche Hypothese, um diesen Widerspruch zu lösen, von drei objectiv existirenden Grundfarben *) keinen Sinn hat, liegt ganz auf der Hand, da die Farbe überhaupt als eine Empfindungsart, als eine Folge des Princips von der specifischen Sinnesenergie durchaus nur eine subjective Bedeutung hat. Von einer objectiv existirenden Farbe kann demnach keine Rede sein. Von diesem Standpunkt geht die Young-Helmholtz'sche Annahme aus.

Dass die Anzahl der Grundfarben, d. h. derjenigen Farben, aus denen alle nur möglichen Farbenempfindungen zusammengesetzt werden können, wenigstens drei ist, lässt sich, wie folgt aus dem bekannten Grassmann'schen Satze herleiten. Wenn zwei Farbenempfindungen gegeneinander näher im Lichtspectrum zu liegen kommen, als die complementären Spectralfarben, so entsteht durch die Mischung der in Rede stehenden Farben eine Empfindung, welche im prismatischen Lichtspectrum zwischen den sie zusammensetzenden Farben liegt, welche um so grössere Sättigung zeigt, je näher die Farbencomponenten im Spectrum gegeneinander liegen, und wenn das Umgekehrte stattfindet, desto weniger gesättigt, d. h. in desto weisslicherem Tone erscheint.

Wenn hingegen die Farbencomponenten weiter als die complementären Farben von einander entfernt liegen, so entsteht durch die Mischung derselben entweder eine Farbenempfindung, welche zwischen einem der beiden Farbencomponenten und der Endfarbe des Spectrums liegt, oder man erhält, wenn man die beiden Endfarben des Spectrums, Roth und Violett, selbst mit einander mischt, einen Farbenton, den man Purpur nennt. Durch die Mischung von mehr als zwei einfachen Farben lässt sich aber keine neue Farbenempfindung mehr darstellen, die nicht schon durch die Mischung von nur zwei einfachen Farben zu Stande

*) Das war gewiss seine Meinung, wie er denn z. B. durch die Absorption farbiger Medien seine drei Grundfarben darzuthun suchte.

kommen könnte. Jede durch Mischung resultirende Farbenempfindung ist auch als Spectralfarbe im Lichtspectrum enthalten, wenn das aus der Mischung von Roth und Violett entstehende Purpur ausgenommen wird. Man kann also nicht neue Farben durch Mischung erhalten, und die durch Mischung entstandenen Farben unterscheiden sich von den einfachen Spectralfarben darin, dass sie im Allgemeinen einen weniger gesättigten, weisslichen Ton besitzen, als die entsprechenden Spectralfarben, als ob man mit der Spectralfarbe eine gewisse Menge weisses Licht zusammengemischt hätte. (Helmholtz, physiologische Optik, § 20). Es können somit alle Farbenempfindungen, welche durch die Mischung einer beliebigen Anzahl von Farben erzeugt werden, immer zu Stande kommen, entweder durch die einfachen Farben des Spectrums selbst, oder durch die Mischung der Spectralfarben mit einander, oder durch die des aus den beiden Endfarben des Spectrums zusammengesetzten Purpurs mit einer gewissen Quantität weissem Lichte. Da aber die Empfindung „Weiss" sich immer durch eine Mischung zweier complementären Farbenempfindungen herstellen lässt, so geht daraus hervor, dass sich jede Farbenempfindung durch eine Mischung von wenigstens drei sogenannten Grundfarben darstellen lässt. Thomas Young und Helmholtz wählten zu diesen Grundfarben, oder, wie sich Helmholtz treffender ausdrückt, Grundempfindungen, Roth, Grün und Violett.

Durch welche Rücksicht Thomas Young auf die Wahl dieser oben genannten Farben als Grundempfindung geleitet ward, kennt man, so viel ich weiss, nicht. Ob durch den Umstand, dass die Farben Roth, Grün und Violett im Lichtspectrum eine gewisse ausgezeichnete Stellung einzunehmen scheinen, oder durch die Erfahrung, dass die Zurückführung jedweder nur möglichen Farbenempfindung auf diese drei Farben am vollkommensten gelungen ist, das bleibt völlig dahingestellt. Jedenfalls hat die Wahl dieser drei Grundempfindungen schlechthin etwas Willkürliches, und sie bedarf noch eines experimentellen Nachweises.

Dass die Empfindung Roth eine der Grundempfindungen ist, wird durch eine auffallende Erscheinung dargethan, nämlich durch die sogenannte Rothblindheit. Die damit behafteten Individuen verwechseln immer bestimmte Farben mit einander, und die eingehenderen Untersuchungen zeigten, dass alle für jene Individuen nur möglichen Farbenempfindungen durch die Mischung von Grün und Violett dargestellt werden können, also dass ihnen die Grundempfindung Roth fehlt. Ob auch die Grünblindheit oder Violettblindheit vorkommt, ist noch zweifelhaft. Dass aber die Empfindung Grün in die Reihe der Grundempfindungen gehört, machen andere Gründe wahrscheinlich. Darunter dieser

eine: Das Grün nimmt insofern eine ausgezeichnete Stellung im Lichtspectrum ein, als alle Mischungen je zweier Farben, welche diesseits oder jenseits des Grüns liegen, wieder Farben hervorbringen, welche fast denselben Grad von Sättigung zeigen, wie die Spectralfarben selbst. Wenn aber das Grün in diese Mischungen kommt, so tritt sofort eine Verminderung der Sättigung ein, d. h. die resultirende Farbe verhält sich wie eine Spectralfarbe, die mit einer gewissen Menge weisses Licht gemischt ist (S. Müller: Archiv für Ophthalmologie XV). Völlig dem Zweifel ausgesetzt ist indessen die Empfindung Violett. Ob man sie zu den Grundempfindungen zu nehmen habe, muss noch entschieden werden. Manche Forscher nehmen mit Maxwell (Philosophical Magazin XIV) die Farbe Blau statt des Violett als eine der Grundempfindungen an. Das Ergebniss meiner Untersuchungen mit dem Leukoskop lautet aber dahin, dass die Young-Helmholtzsche Wahl von drei Grundempfindungen Roth, Grün und Violett als die richtige anzusehen sei.

Zu erwähnen bleiben noch zwei Versuche, die ich mit dem Leukoskop in dieser Hinsicht ausgeführt habe. Das aus spectralem Roth und Violett zusammengesetzte Purpur zerstörte als Dämpfungsfarbe das Farbengleichgewicht im Doppelbilde des Leukoskops nicht. Dies war, wie ich glaube, von vornherein leicht einzusehen, da das Purpur gleichzeitig und mit gleicher Stärke sowohl die rothempfindenden als die violettempfindenden Fasern erregt, und diese also gleichzeitig und im gleichen Grade gedämpft werden, während die grünempfindenden Nervenfasern noch mit voller Stärke empfinden können. In diesem Falle werden zwar

$$\int_{l'}^{l''} f_r \, d\,l \quad , \quad \int_{l'}^{l''} f_v \, d\,l$$

geringer ausfallen wie sonst, und, da aber der Grad der Dämpfung für beide Faserarten derselbe ist, so besteht trotzdem

$$\int_{l'}^{l''} f_r \, d\,l = \int_{l'}^{l''} f_v \, d\,l,$$

folglich auch

$$\int_{l'}^{l''} f_r \cos 2\,(D\,x - y)\, d\,l = \int_{l'}^{l''} f_v \cos 2\,(D\,x - y)\, d\,l.$$

Man sieht hieraus, dass die Maximalblässe im Leukoskope nicht zerstört wird.

Betrachtet man das Doppelbild des Leukoskops in der Maximalblässe, nachdem ein weisses Tageslicht von ziemlich grosser Intensität auf die Netzhaut eingewirkt hatte, so findet man, dass das Farbengleichgewicht im Doppelbilde ebenfalls nicht zerstört wird. Es wirkten auf die Netzhaut Strahlen von allen möglichen Wellenlängen, und die Netzhaut ward so für alle Farbenempfindungen gedämpft, welche jene Strahlen einzeln erregen. Da aber das Farbengleichgewicht im Doppelbilde nicht zerstört wird, so folgt nothwendig daraus, dass die Bedingungsgleichungen für die Maximalblässe fortfahren zu bestehen, obwohl alle drei Faserarten eine gleichzeitige Verminderung ihrer Empfindungsfähigkeit erlitten haben. Mithin muss diese Verminderung der Empfindungsfähigkeit so vor sich gehen, dass die Grösse der Dämpfung für alle drei Faserarten gleich gross ausfällt.

§ 4.

Ich habe mittelst dieses Apparates, den wir Leukoskop nannten, die merkwürdige Thatsache aufgefunden, dass die beiden Augen bei einem und demselben Individuum nicht dasselbe Lichtperceptionsvermögen zu besitzen scheinen. Denn die Maximalblässe, welche ich für das rechte Auge im Leukoskop hergestellt, fand ich immer zerstört, sobald ich statt des rechten mit dem linken Auge das Doppelbild der Spalte betrachtete. Diese Zerstörung des Farbengleichgewichtes im Doppelbilde ging dabei immer so vor sich, dass eine entsprechende Aenderung der eingeschalteten Quarzdicke hinreichte, wieder zur Maximalblässe zu gelangen, geradezu so, als ob die Lichtemission der Lichtquelle, welche ich mit dem Leukoskope betrachtete, kleiner oder grösser geworden wäre.

Es mag manchen, welche sich näher mit der Farbenempfindung beschäftigt haben, schon längst aufgefallen sein, dass das Farbenperceptionsvermögen für beide Augen nicht genau gleich ausfällt, dass z. B. eine weisserleuchtete Papierfläche, abwechselnd mit beiden Augen betrachtet, verschiedene Farbentöne zeigt (bei mir erschien eine weisse vom Tageslichte beleuchtete Fläche, mit dem rechten Auge betrachtet, bläulich weiss, mit dem linken hingegen, gelblich weiss*). Besonders lebhaft gelangt diese Ver-

*) Das Auge sieht grüner, wenn es von aussen her beleuchtet ist, als das beschattete, wie Herr Professor Helmholtz die Güte hatte, mich darauf aufmerksam zu machen. Von dieser Erscheinung hängt indessen die oben mitgetheilte Erscheinung nicht ab. Man mag das linke oder das rechte Auge beleuchten, wie man will, die Erscheinung tritt gerade so auf, als ob die Beleuchtung von der Aussenseite her gar nicht geschehe.

